

Analiza merne nesigurnosti etaloniranja električne kapacitivnosti LCR metara

1. Slobodan Subotić
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar

Beograd, Srbija
slobodansubotic80@gmail.com i 0009-0008-3389-2451

2. Nikola Jovičić
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar

Beograd, Srbija
nikolajovic26@gmail.com

3. Dragan Lazić
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar

Beograd, Srbija
astazu.lazic@gmail.com

Abstract—LCR metri su multifunkcijski uređaji za merenje električne induktivnosti, kapacitivnosti i otpornosti. Periodičnim etaloniranjem LCR metara obezbeđuje se potvrda metroloških karakteristika datih u specifikaciji proizvođača. U radu je prikazana analiza merne nesigurnosti etaloniranja električne kapacitivnosti LCR metara, kao i metoda direktnog poređenja sa referentnim etalonom za električnu kapacitivnost.

Ključne reči—električna kapacitivnost, LCR metar, etaloniranje, merna nesigurnost

I. UVOD

U Tehničkom opitnom centru (TOC), Sektoru za metrologiju, Laboratoriji za primarne etalone električnih veličina (ML 01) etaloniraju se LCR metri, odnosno digitalni multimetri koji imaju funkciju merenja električne kapacitivnosti. U radu je prikazana direktna metoda poređenja sa dva različita tipa referentnih etalona (RE) – kondenzatorima General Radio (GR) 1408A [1] i Hewlett Packard (HP) 16383A [2], na primeru etaloniranja električne kapacitivnosti LCR metra HP 4274A (DUT) [3].

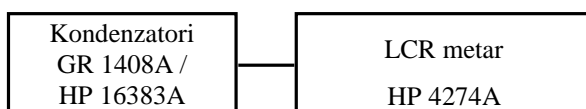
Proračun merne nesigurnosti radi se u skladu sa dokumentima koji propisuju određivanje nesigurnosti kod etaloniranja [4] i [5], specifikacijama proizvođača kondenzatora GR 1408 i HP 16383A, kao i uputstvom za rukovanje LCR metrom HP 4274A.

II. METODA (POSTUPAK) ETALONIRANJA

Kod metode direktnog poređenja sa RE, povezivanje LCR metra, kod koga se etalonira električna kapacitivnost, vrši se prema blok šemi na Sl. 1.

Postaviti na DUT funkciju i opseg u skladu sa mernom tačkom etaloniranja, kao i frekvenciju i napon na kom se vrši etaloniranje. Ovom metodom i navedenim RE mogu se etalonirati vrednosti električne kapacitivnosti 10 pF i 100 pF na frekvenciji 1 kHz. U zavisnosti od raspoloživosti kondenzatora, navedenom metodom mogu se etalonirati vrednosti električne kapacitivnosti od 10 fF do 1 F.

Na Sl. 2 prikazani su kondenzatori GR 1408 etaloniran u nacionalnom metrološkom institutu Velike Britanije (NPL) i HP 16383A etaloniran u laboratoriji ML 01 u TOC-u.



Sl. 1 Blok šema etaloniranja električne kapacitivnosti direktnom metodom poređenja sa RE.



Sl. 2 Kondenzatori GR 1408 i HP 16383A

Etaloniranje je izvršeno u Faradejevom kavezu u uslovima okoline koji se održavaju konstantnim:

- temperatura (23 ± 2) °C
- relativna vlažnost do 80 %

Potrebno je da merna oprema koja se koristi pri etaloniranju bude u referentnim uslovima najmanje 24 sata pre etaloniranja radi temperature stabilizacije, kao i da RE GR 1408 bude priključen na stalno napajanje radi temperature stabilizacije unutar kućišta.

LCR metar se pre etaloniranja temperaturno stabilise najmanje onoliko koliko je predvideo proizvođač u uputstvu za rukovanje, odnosno najmanje 2 sata ako uputstvom to nije definisano.

Merne tačke u kojima se vrši etaloniranje definisane su zahtevom korisnika. Ako korisnik zahteva usklađenost sa specifikacijama u uputstvu za DUT, onda se merne tačke biraju prema definisanim mernim tačkama koje je predvideo proizvođač u uputstvu. U slučaju kada korisnik nema posebnih zahteva, merne tačke se biraju u skladu sa preporukom EURAMET/cg-15/v.3.0:2015.

TABELA I. MERNA OPREMA KOJA SE KORISTI PRI ETALONIRANJU

Red. br.	Merna oprema			
	Naziv	Tip	Proizvođač	Karakteristike i merni opseg
1.	Kondenzator	1408A	GR	100 pF
2.	Kondenzator	16383A	HP	100 pF
5.	LCR metar	4274A	HP	1 pF – 1 F

III. MERNNA NESIGURNOST ETALONIRANJA METODOM DIREKTOG POREĐENJA SA REFERENTNIM ETALONOM

Da bi se utvrdila merna nesigurnost etaloniranja električne kapacitivnosti LCR metra, potrebno je razmotriti sve moguće izvore merne nesigurnosti.

Etalonirana vrednost električne kapacitivnosti, merena na LCR metru HP 4274A, a koju generiše kondenzator GR 1408A, predstavljena je matematičkim modelom koji je dat izrazom:

$$C_{DUT} = C_{RE} + \Delta C + \delta C_{RE} + \delta C_{RE-tk} + \delta C_{RE-st} + \delta C_{DUT-rez} \quad (1)$$

Gde je:

- C_{DUT} – izmerena vrednost kapacitivnosti na DUT,
- C_{RE} – vrednost kapacitivnosti RE,
- ΔC – odstupanje DUT od vrednosti RE,
- δC_{RE} – nesigurnost vrednosti kapacitivnosti RE,
- δC_{RE-tk} – nesigurnost zbog promene kapacitivnosti na RE usled promene temperature,
- δC_{RE-st} – nesigurnost zbog promene kapacitivnosti na RE sa vremenom,
- $\delta C_{DUT-rez}$ – nesigurnost usled rezolucije DUT.

Izvori merne nesigurnosti koji ulaze u budžet merne nesigurnosti navedeni su pojedinačno, a zbirno u tabeli 2.

A. Nesigurnost vrednosti kapacitivnosti RE (merna nesigurnost tip B, normalna raspodela)

Vrednost električne kapacitivnosti RE GR 1408 data je u Uverenju o etaloniranju izdatog od strane NPL. Standardna nesigurnost izračunava se na osnovu proširene merne nesigurnosti iz Uverenju o etaloniranju, koja za vrednost RE od 100 pF na 1 kHz iznosi 90 aF. Raspodela je normalna pa se standardna nesigurnost izračunava tako što se 90 aF podeli sa 2 i dobije se 45 aF. Koeficijenti osetljivosti i nesigurnosti su:

$$c = \frac{\partial C_{DUT}}{\partial(\delta C_{RE})} = 1, \quad u = 45 \text{ aF} \quad (2)$$

B. Nesigurnost zbog promene kapacitivnosti na RE usled promene temperature (merna nesigurnost tip B, trougaona raspodela)

Promena vrednosti električne kapacitivnosti RE usled promene temperature je posledica varijacije temperature u kućištu RE i definisanog temperaturnog koeficijenta. Temperatura u kućištu RE iznosi $30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$, a temperaturni koeficijent $12 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Smatrajući da je raspodela trougaona, standardna nesigurnost promene vrednosti električne kapacitivnosti RE usled promene temperature iznosi $(0,01^\circ\text{C} \cdot 12 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C} \cdot C_{RE})/6^{1/2}$, odnosno 4,899 aF. Koeficijenti osetljivosti i nesigurnosti su:

$$c = \frac{\partial C_{DUT}}{\partial(\delta C_{RE-tk})} = 1, \quad u = 4,899 \text{ aF} \quad (3)$$

C. Nesigurnost zbog promene kapacitivnosti na RE sa vremenom (merna nesigurnost tip B, uniformna raspodela)

Promena vrednosti električne kapacitivnosti RE sa vremenom određuje se preko stabilnosti etalona koja iznosi $\pm 0,3 \cdot 10^{-6}/\text{godini}$. Standardna nesigurnost promene vrednosti RE sa vremenom izračunava se kao $(n \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot C_{RE})$, gde je n broj godina protekao od poslednjeg etaloniranja. Imajući u vidu da je period etaloniranja etalona 5 godina i smatrajući da je raspodela uniformna, standardna nesigurnost promene vrednosti RE sa vremenom iznosi $(1,5 \cdot 10^{-6} \cdot C_{RE})/3^{1/2}$, odnosno 86,6 aF. Koeficijenti osetljivosti i nesigurnosti su:

$$c = \frac{\partial C_{DUT}}{\partial(\delta C_{RE-st})} = 1, \quad u = 86,6 \text{ aF} \quad (4)$$

D. Nesigurnost usled rezolucije DUT (merna nesigurnost tip B, uniformna raspodela)

Greška usled rezolucije LCR metra na opsegu 100 pf i na frekvenciji 1 kHz (High resolution: ON), iznosi 0,01 pF. Smatrajući da je raspodela uniformna, standardna nesigurnost usled rezolucije DUT iznosi $0,01 \text{ pF} / 2 \cdot 3^{1/2}$, odnosno 2,9 fF. Koeficijenti osetljivosti i nesigurnosti su:

$$c = \frac{\partial C_{DUT}}{\partial(\delta C_{DUT-rez})} = 1, \quad u = 2,9 \text{ fF} \quad (5)$$

E. Nesigurnost zbog ponavljanja merenja (merna nesigurnost tip A, normalna raspodela)

Merenje se ponavlja 10 puta za svaku mernu tačku. Izračunava se srednja vrednost greške i pridružena eksperimentalna standardna devijacija. Eksperimentalna standardna devijacija srednje vrednosti izračunava se deljenjem standardne devijacije sa kvadratnim korenom broja merenja.

IV. PRIMER BUDŽETA MERNE NESIGURNOSTI

Primer proračuna merne nesigurnosti dat je za mernu opremu navedenu u Tabeli 1, koja se koristi za etaloniranje električne kapacitivnosti LCR metra HP 4274A uzimajući u obzir nesigurnosti tip A i tip B. Merna tačka koja se etalonira na LCR metru je 100 pF, 1 kHz. Budžeti merne nesigurnosti dati su u Tabelama 2 i 3, dok su grafički prikazi budžeta merne nesigurnosti dati na Sl. 3 i Sl. 4, u zavisnosti od tipa RE.

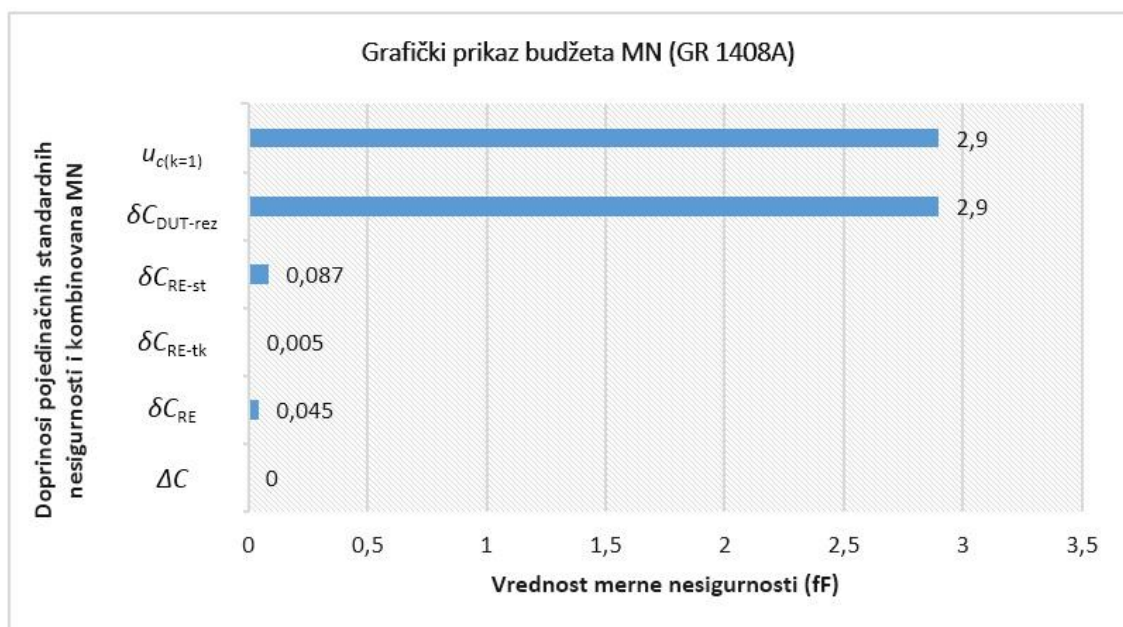
Proširena merna nesigurnost dobije se za koeficijent $k=2$. Kombinovana merna nesigurnost izračunava se kada se u obzir uzme tip A i tip B merne nesigurnosti.

TABELA II. BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI ETALONIRANJA METODOM DIREKTOG POREĐENJA SA REFERENTNIM ETALONOM GR 1408A

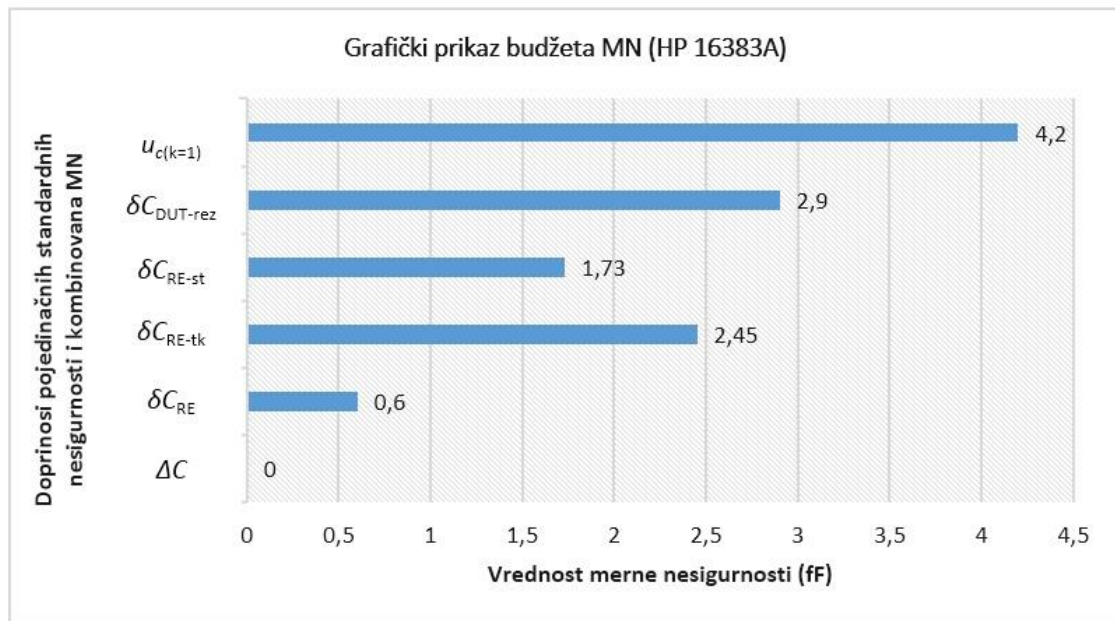
Утицајна величина X_i	Процена x_i	Стандардна несигурност $u(x_i)$	Функција расподеле / тип МН	Коефицијент осетљивости c_i	Допринос стандардној несигурности $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$	
C_{RE}	99,99948 pF	-	-	-	-	
ΔC	0,17 pF	0,0 fF	нормална / А	1	0,0 fF	
δC_{RE}	0 pF	0,045 fF	нормална / Б	1	0,045 fF	
δC_{RE-tk}	0 pF	0,005 fF	троугаона / Б	1	0,005 fF	
δC_{RE-st}	0 pF	0,087 fF	униформна / Б	1	0,087 fF	
$\delta C_{DUT-rez}$	0 pF	2,9 fF	униформна / Б	1	2,9 fF	
C_{DUT}	100,17 pF				$k = 1$	2,9 fF
					$k = 2$	5,8 fF

TABELA III. BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI ETALONIRANJA METODOM DIREKTOG POREĐENJA SA REFERENTNIM ETALONOM HP 16383A

Утицајна величина X_i	Процена x_i	Стандардна несигурност $u(x_i)$	Функција расподеле / тип МН	Коефицијент осетљивости c_i	Допринос стандардној несигурности $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$	
C_{RE}	99,977 pF	-	-	-	-	
ΔC	0,003 pF	0,0 fF	нормална / А	1	0,0 fF	
δC_{RE}	0 pF	0,6 fF	нормална / Б	1	0,6 fF	
δC_{RE-tk}	0 pF	2,45 fF	троугаона / Б	1	2,45 fF	
δC_{RE-st}	0 pF	1,73 fF	униформна / Б	1	1,73 fF	
$\delta C_{DUT-rez}$	0 pF	2,9 fF	униформна / Б	1	2,9 fF	
C_{DUT}	99,98 pF				$k = 1$	4,2 fF
					$k = 2$	8,4 fF



Sl. 3 Grafički prikaz budžeta merne nesigurnosti etaloniranja metodom direktnog poređenja sa referentnim etalonom GR 1408A



Sl. 4 Grafički prikaz budžeta merne nesigurnosti etaloniranja metodom direktnog poređenja sa referentnim etalonom HP 16383A

V. ZAKLJUČAK

Proračun merne nesigurnosti etaloniranja električne kapacitivnosti LCR metra urađen je za potrebe Uputstva za etaloniranje električne kapacitivnosti LCR metara i mostova za električnu kapacitivnost C.41.054 [6] koje se primenjuje u Sektoru za metrologiju u TOC-u. Za konkretan primer proračuna uzet je LCR metar HP 4274A.

U datim budžetima merne nesigurnosti izvor merne nesigurnosti usled rezolucije DUT predstavlja najdominantniji uticaj u oba slučaja, s tim da je u prvom slučaju navedeni uticaj toliko dominantan, da su standardne nesigurnosti RE praktično bez uticaja, te se dolazi do zaključka da je upotreba navedenog RE opravdana samo u slučajevima kada je rezolucija DUT mnogo veća. Na isti način mogu se izračunati merne nesigurnosti etaloniranja bilo koje druge vrednosti električne kapacitivnosti koju meri LCR metar HP 4274A, uzimajući u obzir dati budžet merne nesigurnosti.

U slučaju kada laboratorije ne raspolažu etalonima za električnu kapacitivnost čije su deklarirane karakteristike u klasi kondenzatora GR 1408A, a potrebno je obezbediti što manju mernu nesigurnost etaloniranja LCR metra, preporučuje se upotreba komora za temperaturnu stabilizaciju postojećih kondenzatora u cilju smanjenja uticaja temperaturnih promena ambijenta. Takođe, u cilju smanjenja uticaja promene vrednosti električne kapacitivnosti kondenzatora sa vremenom, preporučuje se skraćivanje perioda etaloniranja kondenzatora.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] Instruction Manual, Type 1408 Reference Standard Capacitor, General Radio, October 1972.
- [2] Measurement/Computation, 16380A Specifications, Hewlett Packard Electronic Instruments and Systems, 1983.
- [3] Multi-frequency LCR meter 4274A, Operating Manual, Hewlett Packard, Part Number: 04274-90004, Mart 1982.
- [4] EA-4/02 M:2022, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration, European Accreditation, April 2022.
- [5] Uputstvo za određivanje merne nesigurnosti kod etaloniranja C.40.005, TOC, Sektor za metrologiju, Beograd 2023.
- [6] S. Vukanić, „Uputstvo za etaloniranje električne kapacitivnosti LCR metara i mostova za električnu kapacitivnost“, C.41.054, TOC, Sektor za metrologiju, Beograd 2023.

ABSTRACT

LCR meters are multifunctional devices for measuring electrical inductance, capacitance and resistance. Periodic calibration of LCR meters ensures confirmation of the metrological characteristics given in the manufacturer's specification. The paper presents the analysis of measurement uncertainty of calibration of electrical capacitance of LCR meters, as well as method of direct comparison with the reference standard for electrical capacitance.

Analysis of measurement uncertainty of electrical capacitance calibration of LCR meters

Slobodan Subotić, Nikola Jovičić, Dragan Lazić